

J-PARC MR における大強度ビーム取り出し時の空洞電圧変動 CAVITY VOLTAGE VARIATION AT BEAM EXTRACTION IN THE J-PARC MR

田村文彦^{*A)}、吉井正人^{A)}、大森千広^{A)}、山本昌亘^{A)}、
野村昌弘^{A)}、島田太平^{A)}、長谷川豪志^{A)}、原圭吾^{A)}
Fumihiko Tamura^{*A)}, Masahito Yoshii^{A)}, Chihiro Ohmori^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)},
Masahiro Nomura^{A)}, Taihei Shimada^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Keigo Hara^{A)}
^{A)} J-PARC Center, KEK & JAEA

Abstract

J-PARC MR provides high intensity proton beams of 420 kW to the neutrino experiment. The proton beams are extracted by fast extraction. It has been found that the cavity voltage jumps up for about 10us just after extraction. It is because the rf feedforward system for beam loading compensation outputs compensation signals for its system delay. The MR cavity has a relatively low Q value of 22 and the cavity voltage can varies in the order of 10us. The voltage variation of the cavity voltage increases with the beam intensity and it is a possible source of the damage of the gap capacitors. A counter measure using the inhibit function of the summation amplifier in the LLRF system has been applied. In this presentation, we present the details of the cavity voltage variation and the results of the counter measure. Also, we present the analysis of beam loading using the voltage variation.

1. はじめに

Japan Proton Accelerator Complex (J-PARC) main ring (MR) において 30 GeV に加速された大強度の陽子ビームは、キッカー電磁石を用いた速い取り出しにより、ニュートリノ実験施設に供給される。速い取り出しでの MR および rf パラメータを、Table 1 に示す。2016 年前半までに、 2.2×10^{14} ppp、2.48 秒の繰り返しで 420 kW のビームパワーでの供給を実現している。

大強度ビームを高い電圧で加速するために、J-PARC MR では、金属磁性体空洞を採用している。現在、1.3 秒繰り返しに必要な加速電圧を実現するために、FT3L コアを用いた空洞への交換が進行中である [2]。現在は、最大 280 kV を 5 台の 4 ギャップ FT3L 空洞により発生させている。この他、2 台の 2 倍高調波空洞が使用されている。基本波空洞の Q 値は約 22 に調整されている。入射から取り出しまでの周波数変化、1.67-1.72 MHz の範囲で同調を用いずに電圧を発生することができる。

大強度ビームを安定に加速するためにはビームローディング補償が重要である。MR では、RF フィードフォワード法を用いたマルチハーモニックビームローディング補償を行っている [3]。RF フィードフォワード法は、ウォールカレントモニターで検出されるビーム信号から、空洞のウェーク電圧を打ち消すように補償信号を生成する方式である。

速い取り出しの際には、ビーム負荷が急に軽くなる一方で、フィードフォワード信号およびドライブ信号は系の遅延分だけ遅れて応答し、また MR 空洞の Q 値は 22 と低いために、取り出し後に一定期間の電圧の跳ね上がりが発生する。ビーム強度の増加とともに跳ね上がりは無視できない電圧となってきた。空洞の加速ギャップには共振調整用の真空コンデンサが取り付けられており、電圧の跳ね上がりは真空コンデンサの寿命への影響も懸念されるため、対策が必要であった。

Table 1: Parameters of the J-PARC MR Fast Extraction and the RF System

circumference	1567.5 m
energy	3-30 GeV
beam intensity	(achieved) 2.22×10^{14} ppp
beam power	(achieved) 420 kW
repetition period	2.48 s
accelerating period	1.4 s
accelerating frequency	1.67-1.72 MHz
harmonic number	9
number of bunches	8
maximum rf voltage	280 kV
No. of FT3L cavities	5
second harmonic cavities	2
Q-value of rf cavity	22

2. 大強度ビーム取り出し時の空洞電圧変動

390 kW ビームを加速し取り出した時の空洞のギャップ電圧変動の様子を Figure 1 に示す。横軸は加速終了 (P3 タイミング) からの時間 [μ s] である。上段は FCT により測定されたビーム信号、中段は空洞 1 号機のギャップ電圧、下段はフィードフォワード信号である。

ビームは P3 から 38 μ s 後に取り出されている。取り出し直前には、加速電圧は 256 kV に設定されており、5 台の 4 ギャップ空洞によりこの電圧を発生させていることから、ギャップ電圧は 12.8 kV である。ビームの取出し直後から、取り出し後に約 7 μ s かけて 18.1 kV まで跳ね上がる。これは、速い取り出しの際には、ビーム負荷が急に軽くなる一方で、フィードフォワード信号およびドライブ信号は系の遅延分だけ遅れて応答することが理由である。MR 空洞の Q 値は 22 と低く、rf

*fumihiko.tamura@j-parc.jp

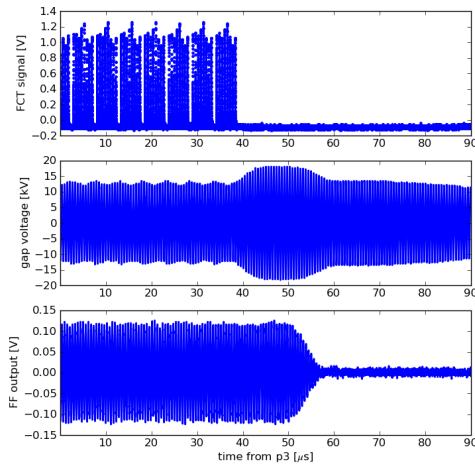


Figure 1: Waveforms near extraction with 390 kW beam, (top) FCT signal, (middle) cavity gap voltage, and (bottom) feedforward signal.

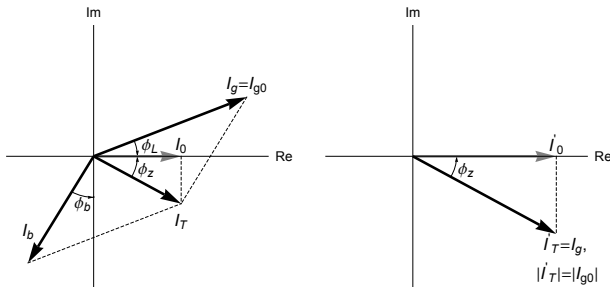


Figure 2: Phasor diagrams (left) with beam in steady state and (right) just after beam extraction.

周波数が約 1.7 MHz であることから、急な入力の変化に対し、約 $10 \mu\text{s}$ の時定数で応答する。測定された変動時間 $7 \mu\text{s}$ は Q 値から期待される応答時間とコンシステントである。図中、フィードフォワード信号は P3 から $50 \mu\text{s}$ まで最大値を保ち、そこから減少に転ずる。この比較的大きな遅延は、フィードフォワードシステム内部のフィルタによるものである。 $57 \mu\text{s}$ ではフィードフォワード信号はほぼ 0 となる。ギャップ電圧は、フィードフォワード信号の減少とともに設定値に近づき、P3 から $60 \mu\text{s}$ ではほぼ設定値となる。結果、約 $10 \mu\text{s}$ の間、18 kV の電圧の跳ね上がりは継続している。

3. ビームローディングの解析

ビームローディングの変化の観点から、取り出し時の電圧変化を解析することを試みた。Figure 2 の左図に、定常状態でのフェーザダイアグラムを示す。ここに、 I_b と ϕ_b はビーム電流およびビームの位相、 I_g と ϕ_L は真空管の出力電流およびローディング角である。ビーム加速時の I_g を I_{g0} と置く。 I_g は、ドライブ電流とフィードフォワード電流の合成である [4]。空腔に流れ込む全電流 $I_T = I_g + I_b$ により空腔電圧が発生する。 ϕ_z は空腔のデチューニング角である。 I_T を一定に

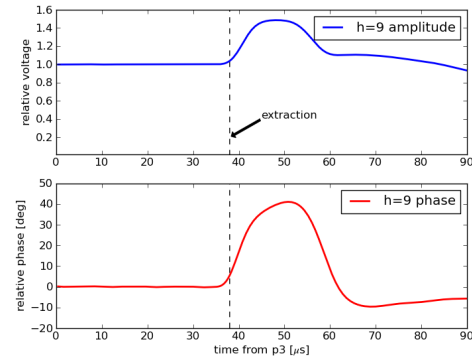


Figure 3: Variation of the relative amplitude and phase of ($h = 9$) component with 390 kW beam.

保つように電圧は制御される。実軸への射影 I_0 を用いて、relative loading factor Y は、 $Y = I_b/I_0$ として定義される。この時、

$$I_g = \frac{I_0 + I_b \sin \phi_b}{\cos \phi_L} = \frac{I_0(1 + Y \sin \phi_b)}{\cos \phi_L}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \tan \phi_L &= -\frac{I_0 \tan \phi_z - I_b \cos \phi_b}{I_0 + I_b \sin \phi_b} \\ &= -\frac{\tan \phi_z - Y \cos \phi_b}{1 + Y \sin \phi_b} \end{aligned} \quad (2)$$

の関係がある。

速い取り出しによりビーム電流が急になくなった時の電流の関係を、Figure 2 右図に示す。ビーム電流がなくなったために、空腔に流れ込む全電流 I_T は真空管の出力電流 I_g に等しい。先に述べたように、フィードフォワード信号およびドライブ信号は系の遅延分だけ遅れて応答するため、ビームが取り出された直後には真空管の出力電流は変化せず、 $I_T = I_{g0}$ である。

フェーザダイアグラムから、ビーム取り出し直後の電圧の変動の割合は、 I_T/I_T となることが期待される。また、ビームの取り出し前後で、真空管の出力電流を基準とした空腔電圧位相は $\phi_L + \phi_z$ だけ変化する。

Figure 3 に、390 kW 加速時の P3 付近におけるギャップ電圧の $h = 9$ 成分の変動の様子を示した。ビーム取り出し前の複素電圧成分を基準として、上図、下図ではそれぞれ振幅、位相の相対値をプロットしている。ビーム取り出し前から電圧と位相が変化しているのは、 $h = 9$ 成分の検波の信号処理において移動平均を用いているためである。

取り出し時には $\phi_z = 0.025$ 、また $\phi_b = 0$ であるので、これらを (1) および (2) に代入し、 I_{g0} と $I_T = I_0/\cos \phi_z$ の比が測定された電圧比となるよう方程式を解いて Y および ϕ_L を求めた。390 kW ビーム加速時の電圧信号を検波して求めたビーム取り出し前後の空腔電圧の比は 1.48 であり、この時 $Y = 1.12$ 、 $\phi_L = 48$ 度を得る。

測定された位相変化は 41 度であり、計算された $\phi_L + \phi_z = 49$ 度よりやや小さい。Figure 3 の位相を見ると、電圧が減少に転ずる時点でまだ変化が継続しており、空腔の Q 値による時定数の影響と考えられる。

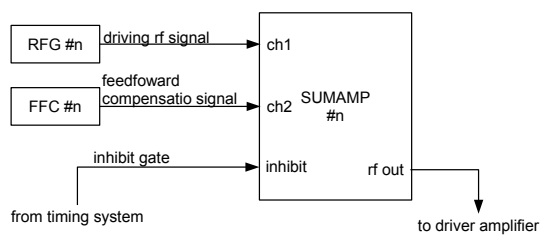


Figure 4: Block diagram around the SUMAMP in the LLRF control system of the MR. #n is the cavity number.

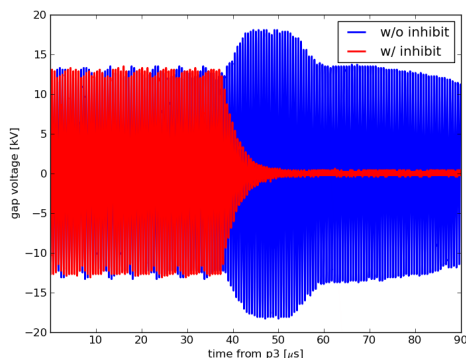


Figure 5: Comparison of gap voltage waveforms (blue) without and (red) with the inhibit gate for the SUMAMP.

4. 対策

MR 空洞では、共振周波数の調整のために各加速ギャップに真空コンデンサが取り付けられているが、ビーム強度が上がってきた 2016 年に入り、真空コンデンサの耐電圧低下により空洞に電圧を発生できなくなる故障が数回発生した。ビーム取り出し時の電圧の跳ね上がりは約 18 kV と真空コンデンサの仕様 (25 kV) 範囲内かつ 10 μ s 程度と短時間であるものの、真空コンデンサの寿命への影響が疑われるため、対策が必要となった。

ビーム取り出し時の電圧の跳ね上りを抑えるためには、ビームが取り出されるのに合わせて、空洞に真空管から供給される電流を止めてやれば良く、LLRF からの出力を所望のタイミングで高速に抑止することが必要となる。MR の LLRF において、電圧制御、フィードフォワードのパターンのサンプリング周期は 0.2 ms であるために、パターンにより出力を抑止することは困難である。このため、LLRF 制御システムの一部であるサムアンプの inhibit 機能を使い、信号の抑止を行うこととした。

LLRF 制御システムにおける、サムアンプ周辺の信号の流れを Figure 4 に示す。空洞電圧を発生させるために RFG (RF generator) モジュールから出力される LLRF ドライブ信号と、ビームローディング補償のために FFC (Feedforward controller) モジュールから出力されるフィードフォワード信号は、サムアンプにより重畳されて、ドライバアンプに送られる。電圧制御およびビームローディング補償は空洞システム毎に行う必要があり、空洞システム全てについて RFG、FFC モジュールおよびサムアンプを備えている。

サムアンプには、ドライバアンプに送る信号を抑止するための inhibit 入力を備えている。inhibit 入力は、もともと、遅い取り出し時に空洞の加速ギャップをショートする際の、ギャップショート回路の保護回路として設計されたものである (ただし、現在の遅い取り出しではギャップショートを使用していない)。inhibit 入力にゲートが入力されると、サムアンプ内部の半導体スイッチにより高速に出力が抑止される。inhibit が入力されてから実際にサムアンプ出力が抑止されるまでの時間は、約 2 μ s である。

inhibit ゲートは、J-PARC タイミングシステムにより発生させる。MR の周期のなかで、任意のスケジュールされたタイミングでゲートを発生させることができる。

出力の抑止はビーム取り出し後にできるだけ早く行う必要がある一方、早すぎてビーム取り出し前に抑止されてしまうとビームがデバンチするなどの影響が出てしまうため、inhibit ゲートのタイミング調整は、ビーム波形および空洞電圧波形を見ながら行った。

390 kW ビームの取り出し時における、inhibit の有無による空洞ギャップ電圧波形の比較を Figure 5 に示す。inhibit 適用前は、前述のようにビーム取り出し後に 18 kV までギャップ電圧跳ね上がっていた。ビームの取り出しに合わせて inhibit ゲートタイミングを調整した結果、ビームの取り出し後にギャップ電圧は即減少に転じ、空洞の時定数である 10 μ s 程度でほぼゼロとなる。期待した通り、ギャップ電圧の跳ね上りを抑制することに成功した。この時、ビーム波形を確認し、周回するビームへの影響はないことを確かめた。

ニュートリノビームラインにおいても、inhibit の有無によるビームへの影響は観測されなかったため、2016 年 4 月中旬より、inhibit を適用してビーム供給を行っている。5 月末までにビームパワーは 420 kW まで上昇したが、inhibit 適用後は真空コンデンサの耐電圧低下は発生しなかった。このことから、電圧の跳ね上がりは真空コンデンサの寿命に影響を与えていることが推察される。しかしながら、仕様範囲内の電圧で劣化が進む理由については現在のところ判明していない。

5. まとめ

J-PARC MR における大強度ビームの速い取り出しでは、ビーム負荷が急に軽くなることが原因で空洞電圧の跳ね上がりが生じる。ビーム強度の増加につれ、この電圧の跳ね上がりも大きくなっており、真空コンデンサの寿命とも関係があると推察されることから、対策が必要としていた。LLRF 制御システム内のサムアンプのインヒビット入力を利用して、ビーム取り出しのタイミングに合わせて出力を抑止することで、この電圧の跳ね上りを抑制することに成功した。今後の MR の大強度運転に向け、この手法は必須であると考えられる。

参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, in this proceedings, MOOLP04 (2016).
- [2] K. Hara *et al.*, in this proceedings, TUP002 (2016).
- [3] F. Tamura *et al.*, PRST-AB, 16, 051002 (2013).
- [4] F. Tamura, OHO10 テキスト (2010).